

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:
INGENIERA ELECTRÓNICA E INGENIERO ELECTRÓNICO**

**TEMA:
DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED ÓPTICA PASIVA
(PON) A 10 GBAUD/S EMPLEANDO PAM4 CON PRE-
COMPENSACIÓN**

**AUTORES:
GLADYS JANNETH FLORES PULUPA
MARCO FERNANDO VILLAVICENCIO TENELEMA**

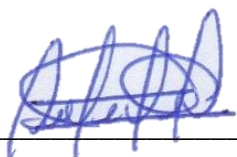
**TUTOR:
GERMÁN VICENTE ARÉVALO BERMEO**

Quito, enero del 2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Gladys Janneth Flores Pulupa y Marco Fernando Villavicencio Tenelema con documentos de identificación N° 1720998408 y N° 1719315671 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación, intitulado: “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED ÓPTICA PASIVA (PON) A 10 GBAUD/S EMPLEANDO PAM4 CON PRE-COMPENSACIÓN”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniera Electrónica e Ingeniero Electrónico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Gladys Janneth Flores Pulupa

CI: 1720998408



Marco Fernando Villavicencio Tenelema

CI: 1719315671


Quito, enero de 2019.

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE

TUTOR

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el artículo académico, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED ÓPTICA PASIVA (PON) A 10 GBAUD/S EMPLEANDO PAM4 CON PRE-COMPENSACIÓN” realizado por Gladys Janneth Flores Pulupa y Marco Fernando Villavicencio Tenelema, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, enero del 2019.



Germán Vicente Arévalo Bermeo
CI: 010315250-0

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED ÓPTICA PASIVA (PON) A 10 GBAUD/S EMPLEANDO PAM4 CON PRE-COMPENSACIÓN

Gladys Flores Pulupa¹, Marco Villavicencio Tenelema¹

Resumen

En el siguiente artículo se realiza un análisis comparativo del desempeño de un sistema de comunicación óptico con modulación PAM-4 sin y con pre-compensación. Esto se llevó a cabo sobre una red óptica pasiva (passive optical network - PON) mediante dos escenarios que son la implementación de la red en equipos reales y una simulación utilizando el software Optsim. Para ambos escenarios la generación y el procesamiento digital de la señal (DSP) se lo hizo off-line en MatlabTM. Los datos fueron transmitidos a 10 GBaud/s sobre un enlace óptico a 20km y 45 km de fibra monomodo G652D, mismos que fueron recibidos empleando un fotoreceptor de detección directa. Los resultados experimentales demuestran que para la transmisión de datos PAM4 sin pre-compensación de dispersión se tiene una penalidad de alrededor de 1 dB en comparación a la transmisión con pre-compensación para lograr un BER de 10^{-3} tanto en 20km como en 45 km de fibra óptica.

Palabras Clave: PON, PAM-4, pre-compensación.

Abstract

In the following paper, a comparative performance analysis of an optical communication system with PAM-4 modulation with and without dispersion pre-compensation is performed. This took place over a passive optical network (passive optical network - PON) through two scenarios: an experimental setup using real equipment and a simulation using Optsim. For both scenarios, the data generation and the digital signal processing (DSP) were performed off-line using MatlabTM. Data transmitted at 10 Gbaud/s, in an optical link of 20km and 45 km of G652D single-mode fiber, were received using a direct detection system photoreceptor. Experimental results show that there is a 1 dB penalty for achieving a goal BER of 10^{-3} when transmitting without dispersion pre-compensation.

Keywords: PON, PAM-4, pre-compensation.

¹ Estudiante de Ingeniería Electrónica (mención Telecomunicaciones) - Universidad Politécnica Salesiana, UPS - sede Quito.

1. Introducción

Las PON son redes que permiten eliminar componentes activos y sustituirlos por componentes ópticos pasivos siendo utilizadas por sus múltiples ventajas donde incluyen topologías punto a multipunto además del incremento de capacidad y calidad de servicio (voz, video y datos). Ahora con la creciente demanda del uso de las redes PON los grupos de telecomunicaciones como el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) y la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) proponen las PON de próxima generación (NG-PON) que proveen mayor capacidad, disminución de costo y un mayor número de usuarios[1]. Este tipo de redes presenta ciertas desventajas una de ellas es la dispersión, la cual degrada la señal enviada provocando así un efecto negativo en la transmisión de señales y limitando la velocidad de transmisión [2]. El uso de la pre-compensación permite aumentar la velocidad de datos y distancia, además mejora la distorsión cromática. En este contexto, la investigación reportada en [3], pretende utilizar un modulador dual drive Mach-Zehnder (DDMZM) en una transmisión de señal PAM-4 de 128 Gbit/s en un enlace SMF el cual permitirá una transmisión libre de dispersión. El estudio de la modulación de amplitud de pulsos de cuatro niveles (PAM4) mediante una detección directa se considera como una solución prometedora debido a su estructura, su baja tolerancia de dispersión cromática (CD) y bajo costo respecto a sistemas con detección coherente. Este tipo de modulación se emplea en redes de área metropolitana o en data centers ofreciendo una mejora en el ancho de banda. En [4] se proporciona la evaluación de la tolerancia de la

dispersión cromática aplicando un formato de pulsos NRZ modificando distancias y con diferentes limitaciones de ancho de banda obteniendo una degradación del BER versus OSNR a medida que la distancia crece. En [5], los sistemas de detección directa en una modulación PAM-4 permiten diseñar una configuración de transceptor más simple que los sistemas digitales coherentes, y una eficiencia espectral más alta que los sistemas binarios. La técnica de modulación PAM-4 permite duplicar la tasa de bits de datos en una transmisión con el mismo ancho de banda respecto a la modulación binaria sin retorno (NRZ) [6].

Según [7], la modulación por amplitud de pulsos (PAM) cuenta con una alta eficiencia espectral por lo que propone un nuevo concepto en la generación de señales PAM-4 mediante una técnica de superposición óptica que permite a su vez reducir linealidad del sistema. En [8], se describe la transmisión de señal PAM de 1 Gbit/s un enlace con fibra óptica monomodo donde se presentan esquemas que se basan en tres módulos de fibras de compensación de dispersión (Dispersion Compensation Fiber - DCF) como son la pre-compensación, post-compensación y compensación simétrica. La combinación de estos esquemas ofrece un enlace de transmisión óptica de alto rendimiento y alta velocidad de bits al superar la limitación de larga distancia [8].

Este artículo tiene como fin analizar la implementación de una red PON, empleando modulación por amplitud de pulsos de cuatro niveles (PAM-4) con un método de pre-compensación para lo cual se realizó una variación de amplitud en cada nivel de la señal a

Flores-Villavicencio/ DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED ÓPTICA PASIVA (PON) A 10 GBAUD/S EMPLEANDO PAM4 CON PRE-COMPENSACIÓN

transmitir sobre un enlace de 20 y 45 km de fibra óptica monomodo (Simple Mode Fiber - SMF) G652D, utilizando equipos de laboratorio y posteriormente realizar el procesamiento de la señal en el software de Matlab.

El resto del presente artículo está organizado de la siguiente forma: La

sección dos describe el escenario experimental y en un entorno de simulación de la red PON, empleando la técnica de pre-compensación, la sección tres presenta y analiza los resultados obtenidos en la simulación y en la experimentación. Finalmente, en la sección cuatro se concluye el artículo.

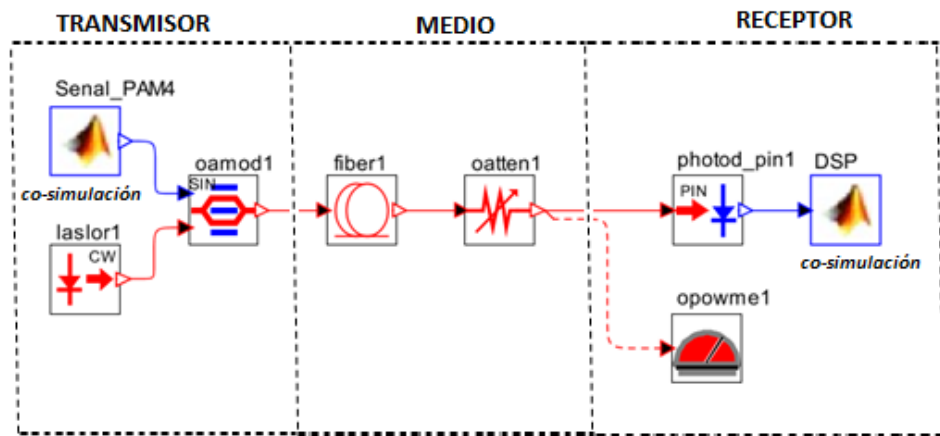


Fig. 1 Diseño de la red PON en Optisim.

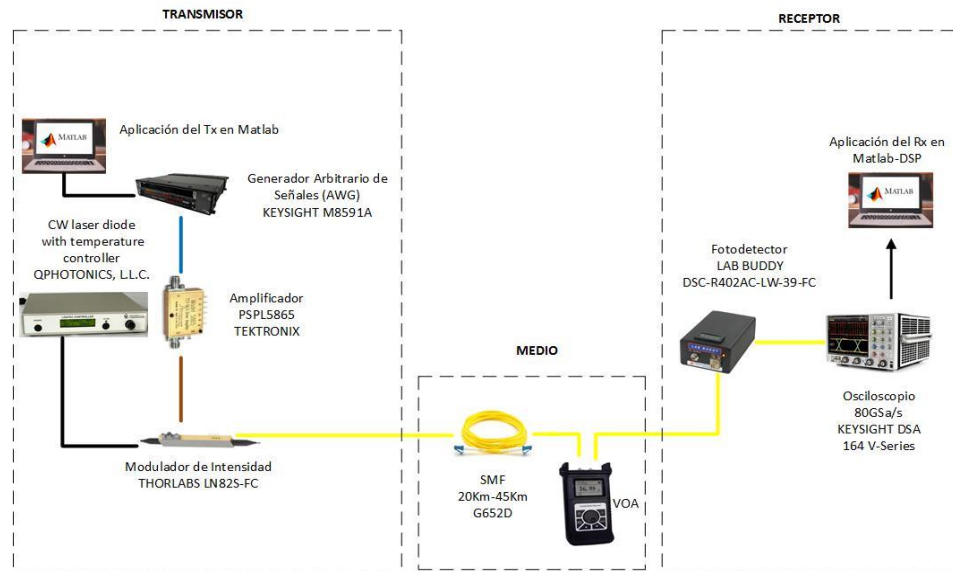


Fig. 2 Red PON implementada.

2. Implementación

2.1. Generación de datos

El software utilizado para la generación de la información fue la herramienta matemática Matlab, se creó una secuencia binaria de 128 bits, la cual se la repitió 832 veces con el fin de obtener un total de 106496 bits que se almacenaron en un archivo de texto (txt), los mismos que fueron codificados mediante un código gray [9]. Luego fueron modulados con una Modulación de Amplitud de Pulso de cuatro niveles (PAM-4), esta señal a la vez se agregó una pre-secuencia de entrenamiento de veintidós ceros y unos con una amplitud igual a uno, usados como bits de sincronización que cumplieron la función de indicadores de inicio y de fin de la trama. Además, se realizó la variación de la amplitud de los niveles de la señal PAM-4 (pre-distorsión) con el objetivo de compensar la dispersión causada por la fibra óptica.

2.2. Adquisición y procesamiento digital de la señal

La señal entregada por el receptor (fotodetector) fue adquirida mediante un canal (el canal 1) del osciloscopio en tiempo real, esta señal fue muestreada por dicho osciloscopio un número de muestras por baudio que se calculó mediante la ecuación (1), conociendo que la velocidad de transmisión es 10Gbaud/s y la velocidad de muestreo es 80 GSa/s en el osciloscopio.

$$S_{pba} = \frac{V_m}{V_{Tx}} \quad (1)$$

dónde, S_{pba} son las muestras por Baudio (Samples per baud), V_m es la velocidad de muestreo y V_{Tx} es la velocidad de transmisión [10], a esta señal se le realizó un procesamiento

posterior off-line en Matlab, que consistió en que a cada una de las señales obtenidas del osciloscopio se aplique un filtro pasa bajos, del tipo FIR Equiripple de tercer orden, con un ancho de banda de 10 GHz para eliminar el ruido. A continuación se realizó la asignación a un nivel correspondiente de los cuatro que tiene la señal PAM-4 para conseguir los símbolos al vector de valores de la señal recibida y finalmente se procedió a evaluar el BER respectivo.

2.3. Co-simulación

El diseño de la red óptica se realizó en un entorno de co-simulación entre Matlab y el software Optsim como se puede observar en la Fig. 1.

El transmisor estuvo compuesto por un láser Lorentzian de onda continua con una potencia óptica de 12 dBm, el cual se conectó a un modulador de intensidad, configurados con una tensión de compensación máxima de transmisividad (maximum transmissivity offset voltage) de valor 8.75V y el V_{pi} de valor 9.5V, mismo que se conectó a un bloque de co-simulación donde se generaron los 106496 bits que fueron transmitidos como una señal PAM-4 con pre-compensación de dispersión como se lo describió en la sección 2.1. Para el efecto se realizó una integración de funciones del software Matlab dentro del software Optsim.

El enlace óptico constó de una fibra óptica monomodo estándar G.652.D de 20 km o de 45 Km, con una dispersión de 16 ps/nm/Km y atenuación de 0.2 dB/km. Se incluyó en el diseño un atenuador óptico variable (Variable Optic Attenuator - VOA), con un rango de atenuación entre 0 a 15 dB, obteniendo diferentes potencias de recepción, para determinar el BER en función de la potencia recibida en el

receptor. En la parte del receptor se colocó un fotodiodo PIN, el cual se conectó a un bloque de co-simulación donde se realizó el procesamiento de la señal PAM-4, como se lo reseñó en una parte de la sección 2.2.

2.4. Experimentación

La Fig. 2 hace referencia a la configuración del prototipo implementado para la detección directa de datos.

La red óptica pasiva estuvo compuesta en la parte del transmisor por un láser de onda continua (continuous wave – CW) con control de temperatura, con una potencia de transmisión de 12 dBm [11]. La señal PAM-4 fue aplicada al modulador de intensidad (IM) LN82S-FC[12], el mismo que previamente se caracterizó a través de la variación del voltaje de bias (V_{bias}) con el fin de determinar su punto óptimo de trabajo. La señal de radio frecuencia (RF) que modula eléctricamente los datos se amplificó previamente, antes de enviarla al modulador óptico, con un amplificador RF Tektronix modelo PSPL5865 de 12,5 Gb/s con rendimiento clave de 7.5 voltios de amplitud de salida cuyos pines 1,3 y 7 se configuraron con un voltaje de alimentación de (+8V), (-5V) y (GND) respectivamente [13]. La señal fue amplificada hasta obtener el voltaje RF (VRF) correspondiente al voltaje V_{π} del modulador óptico, con el fin de que las potencias de los niveles de la señal PAM-4 como se ilustran en la Fig. 3, se ubiquen lo más simétricamente posible. Este amplificador se enlazó al generador arbitrario de señales (Arbitrary Waveform Generator - AWG) M8195A de 65 GSa/s con velocidad de muestreo de hasta 65 GSa / s (hasta 4 canales) [14], con la ayuda de la herramienta de software matemático Matlab que permitió generar los datos como se describió en

la sección 2.1 y enviarlos por la fibra óptica a una velocidad de 10Gbaud/s.

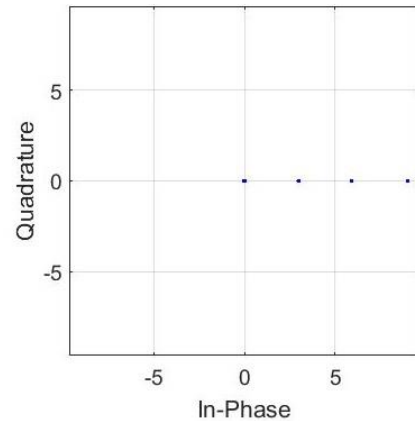


Fig. 3 Diagrama de constelación de la señal PAM-4.

En la segunda prueba de experimentación, el enlace óptico se compuso por una fibra óptica monomodo (SMF) G652D de 20 km y 45 Km, con una dispersión de 17 ps/nm/km y atenuación de 0.2 dB/km. También se incluyó un VOA, con un rango de atenuación entre 1 a 14 dB, adquiriendo diferentes potencias de recepción, para determinar el BER en función de la potencia recibida en el receptor.

Por otra parte, en el lado de la recepción se empleó un fotodetector LAB BUDDY DSC-R402AC-LW-39-FC de Discovery Semiconductors, que recibe la señal óptica y la transforma a una señal RF en su salida [15]. La señal eléctrica obtenida a la salida del fotodetector se envió a un osciloscopio de tiempo real Keysight DSAV164A de 16GHz y 4 canales analógicos con una frecuencia de muestreo máxima de 80 GSa/s (2 canales) que permitió la adquisición de la señal PAM-4 [16] para luego procesarla como se lo describió en la sección 2.2.

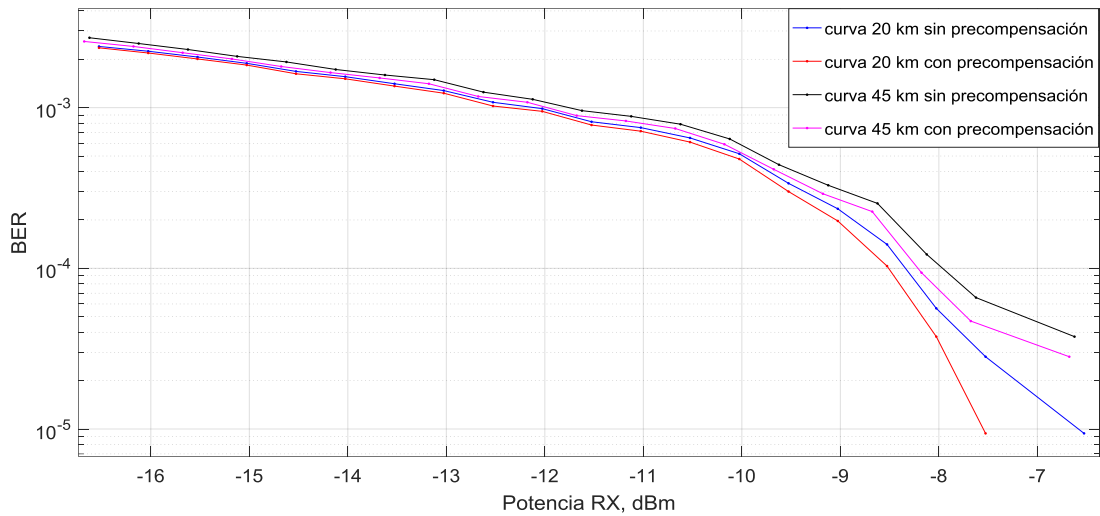


Fig. 4 Gráfica BER vs Potencia de recepción (resultados de la simulación).

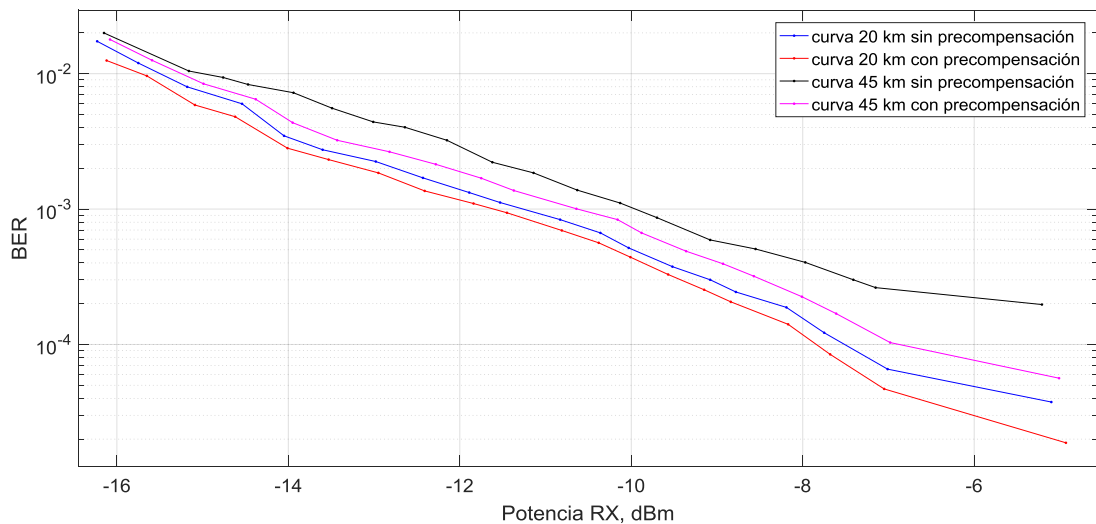


Fig. 5 Gráfica BER vs Potencia de recepción (resultados de la experimentación).

3. Análisis de Resultados

En la simulación se diseñó una red óptica pasiva (PON) empleando PAM4 con pre-compensación, introduciendo un rango de atenuación variable entre 0 a 15 dB, esto se lo realizó mediante dos escenarios: 20 y 45 km de fibra óptica monomodo.

En la Fig. 4 se muestra la curva BER vs. potencia de recepción para los diferentes escenarios de la red simulada. En el caso de la transmisión sin pre-compensación de dispersión a

20 Km de fibra óptica la sensibilidad para un BER de 10^{-3} corresponde a un valor de -12,53 dBm y en 45 Km de fibra fue de -12,12 dBm; con pre-compensación de dispersión a 20 Km de fibra la sensibilidad para un BER de 10^{-3} corresponde a un valor de -12,68 dBm y en 45 Km de fibra fue de -12,18 dBm.

En la Fig. 4 se observa que las curvas de la transmisión con pre-compensación de dispersión a 20 y 45 Km de fibra se desplazan hacia abajo con respecto a las curvas de la

transmisión sin pre-compensación de dispersión a 20 y 45 Km de fibra respectivamente, debido a que con pre-compensación se obtuvo menos bits erróneos a una potencia similar, esto indica que con la transmisión con pre-compensación de dispersión hubo un mejor rendimiento.

Por otra parte, experimentalmente se probó una red óptica pasiva (PON) empleando PAM4 con pre-compensación, con un rango de atenuación entre 1 a 14 dB, para: 20 y 45 km de fibra óptica SMF G652D a 10 GBaud/s, tanto con la técnica sin pre-compensación y con pre-compensación de dispersión.

En la Fig. 5 se muestra la curva BER vs. Potencia de recepción. En el caso de la transmisión sin pre-compensación de dispersión a 20 Km de fibra, la sensibilidad para un BER de 10^{-3} corresponde a un valor de -11,53 dBm y en 45 Km de fibra fue de -10,13 dBm. En la transmisión con pre-compensación de dispersión a 20 Km de fibra la sensibilidad para un BER de 10^{-3} corresponde a un valor de -11,89 dBm y en 45 Km de fibra fue de -11,14 dBm.

En la Fig. 5 se observa que las curvas de la transmisión con pre-compensación de dispersión a 20 y 45 Km de fibra se desplazan hacia abajo con respecto a las curvas de la transmisión sin pre-compensación de dispersión a 20 y 45 km de fibra respectivamente. Como se mencionó anteriormente con pre-compensación se obtuvo menos bits erróneos a una potencia similar esto mostró que la transmisión con pre-compensación de dispersión tuvo un mejor rendimiento.

Se puede observar que los resultados de la red simulada, presentados en la Fig. 4, son similares a los resultados

experimentales obtenidos, que se ven en la Fig. 5.

4. Conclusiones

En el actual trabajo de investigación se ha demostrado a través de simulación y de forma experimental una red PON en la que se transmiten datos PAM-4, donde se logra un mejor desempeño utilizando pre-compensación de dispersión a comparación de no utilizar pre-compensación. Se logró obtener un BER de 10^{-3} con una potencia de recepción aproximada de -10.13 dBm sin pre-compensación de dispersión, mientras que con pre-compensación de dispersión se logra el mismo BER con una potencia de recepción aproximada de -11.14 dBm, después de 45 km de fibra a 10 Gbaud/s.

Por lo tanto, el sistema que utiliza el método de pre-compensación es más eficiente puesto que necesita aproximadamente 1dBm menos de potencia de recepción para conseguir el BER objetivo, en comparación con el sistema sin pre-compensación.

5. Referencias

- [1] S. Bindhaiq *et al.*, "Recent development on time and wavelength-division multiplexed passive optical network (TWDM-PON) for next-generation passive optical network stage 2 (NG-PON2)," *Opt. Switch. Netw.*, vol. 15, pp. 53–66, 2015.
- [2] M. Moghaddasi and S. B. A. Rahman, "Comparison between NRZ and RZ OOK modulation format in chromatic dispersion compensation in both electrical and optical compensator," *ISBEIA 2011 - 2011 IEEE*

- Symp. Business, Eng. Ind. Appl.*, pp. 494–497, 2011.
- [3] Q. Zhang, N. Stojanovic, C. Xie, C. Prodaniuc, and P. Laskowski, “Transmission of single lane 128 Gbit/s PAM-4 signals over an 80 km SSMF link, enabled by DDMZM aided dispersion pre-compensation,” *Opt. Express*, vol. 24, no. 21, p. 24580, 2016.
- [4] R. C. Figueiredo, A. L. N. Souza, S. M. Ranzini, A. Chiuchiarelli, L. H. H. Carvalho, and J. D. Reis, “Investigation of 56-GBd PAM4 bandwidth and chromatic dispersion limitations for data center applications,” *SBMO/IEEE MTT-S Int. Microw. Optoelectron. Conf. IMOC 2017*, vol. 2017–Janua, no. 1, pp. 1–5, 2017.
- [5] A. Masuda, S. Yamamoto, Y. Sone, S. Kawai, and M. Fukutoku, “112 - Gb / s C - band Transmission Using 4 - Level / 7 - Level Coding PAM with Chromatic - Dispersion Pre - compensation under 25 - GHz Bandwidth - Limitation,” pp. 25–27.
- [6] H. Ri and E. V. R. X. U. Hyho, “Design of 20-Gb/s four-level pulse amplitude modulation VCSEL driver in 90-nm CMOS technology,” vol. 6, pp. 195–198, 2016.
- [7] M. Kong, Y. Chen, R. Sarwar, B. Sun, B. Cong, and J. Xu, “Optical superimposition-based PAM-4 signal generation for visible light communication,” *ICOON 2017 - 16th Int. Conf. Opt. Commun. Networks*, vol. 2017–Janua, pp. 1–3, 2017.
- [8] R. K. Ahmed and H. A. Mahmood, “Performance Analysis of PAM Intensity Modulation Based on Dispersion Compensation Fiber Technique for Optical Transmission System,” pp. 126–130, 2018.
- [9] G. Arévalo Bermeo, “Efectividad De La Codificación Grey En La Transmisión De Datos En Un Canal Digital Awgn,” *Ingenius*, no. 14, pp. 30–34, 2016.
- [10] L. Lagos; C. Salcedo, “Implementación y caracterización de un prototipo de sistema de transmisión coherente en redes ópticas pasivas,” 2018.
- [11] Qphotonics, “Laser diode controller set, 1200mA.” [Online]. Available: <http://www.qphotonics.com/CW-laser-diode-driver-with-temperature-controller-and-mount-QSDIL-1200.html>. [Accessed: 25-Oct-2018].
- [12] Thorlabs, “10 GHz Lithium Niobate Modulators.” [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3918. [Accessed: 25-Oct-2018].
- [13] Tektronix, “Data Sheet: PSPL5865, 12.5 Gb/s Driver Amplifier,” pp. 1–8.
- [14] P. Hindle, G. Lerude, and M. Journal, “M8195A 65 GSa/s Arbitrary Waveform Generator,” pp. 2013–2015, 2015.
- [15] Discovery Semiconductors, “10 GHz Linear InGaAs PIN+TIA Optical Receiver with Optional CDR.” [Online]. Available: https://www.discoverysemi.com/Product_Pages/DSCR402PIN.php. [Accessed: 25-Oct-2018].
- [16] Keysight Technologies, “Data Sheet: Infiniium V-Series Oscilloscopes.”